

## 지진파의 수직성분이 기기면진에 미치는 영향 분석

### The Analysis of the Effect of Vertical Component of Earthquake Ground Motions on the Behavior of Equipment Base Isolation System

김민규, 전영선, 최인길  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

본 연구에서는 구조물 내부에서의 기기면진을 위한 진동대 실험의 분석결과를 제시하고 있다. 특별히 최근 관심이 집중되고 있는 지진파의 수직성분의 영향에 대하여 집중적으로 분석하였다. 지진파의 수직성분에 의한 기기면진효과를 분석하기 위해서 수평방향의 면진에 미치는 영향에 대하여 분석하였고, 또한 일반적인 면진장치에서 지진파의 수직성분에 대한 면진효과에 대하여 분석하였다. 기기면진을 위한 면진장치로는 마찰진자형 베어링(Friction Pendulum System: FPS), 천연고무베어링(Natural Rubber Bearing: NRB) 그리고 고감쇠고무 베어링(High Damping Rubber Bearing: HDRB)을 사용하였다. 주파수 특성이 다른 3종류의 지진파를 이용하여 진동대 실험을 수행하였으며, 수평 1방향 가진의 경우와 수직방향 지진력을 고려한 경우에 대한 진동대 실험을 수행함으로써 지진파의 수직성분에 대한 면진장치의 거동을 분석하였다.

**주요어** : 수직지진운동, 진동대 실험, 마찰진자형 베어링(FPS), 천연고무베어링(NRB), 고감쇠고무 베어링(HDRB)

#### ABSTRACT

This paper presents the effect of vertical component of earthquake ground motions on the behavior of equipment base isolation system. For this purpose, the base isolation effects are considered when the 3 dimensional shaking tests are performed. The vertical seismic isolation effects are also considered. The Friction Pendulum System (FPS), natural rubber bearing (NRB) and high damping rubber bearing (HDRB) were selected for the isolation. The three kinds of seismic motions which frequency contents are much different are selected for the shaking table test.

**Key word** : vertical seismic motion, shaking table test, Friction Pendulum System (FPS), Natural Rubber Bearing (NRB), High Damping Rubber Bearing (HDRB)

## 1. 서론

기존의 내진설계에서는 지진시 작용하는 수평력에 저항하도록 하는 것을 목적으로한다. 이것은 정적인 상태에서는 횡방향 외력이 크지 않으므로 대부분의 구조물이 횡방향 하중에 취약한 현실에 기인한 것이다. 횡하중은 크게 지진에 의한 것과 바람에 의한 것으로 대별될 수 있으며 바람에 의한 횡하중은 그 빈도가 자주 발생하지만 하중의 크기가 크지 않은 반면 지진으로 인해 발생하는 횡하중은 발생빈도가 적음에도 불구하고 발생했을 때의 에너지가 상당히 크기 때문에 구조물의 설계시 횡하중은 지진력에 의해서 결정된다고 할 수 있다. 그러나 최근들어 이러한 지진력의 수평성분에 수직성분이 크게 작용한 예가 자주 발생하고 있다. 1995년의 일본 고베지진이나 1999년 대만의 Chi-Chi 지진의 경우는 지진의 수직성분이 기존의 지진과는 다르게 상당히 크게 관측되었고 또 이러한 수직성분에 의한 피해사례가 관측되기도 했다. 따라서 지진과의 수직성분에 대한 대비가 필요하게 되었고 많은 시방서에서는 구조물의 설계시 수직진동에 대한 영향을 고려하도록 하는 내용이 추가되었다. 따라서 본 연구에서는 수평하중에 저항하도록 설계된 면진장치를 이용하여 기기면진시 지진과의 수직성분에 대한 영향을 고찰하였다. 실험에 사용한 면진장치가 수평하중을 고려하도록 제작된 것이므로 지진과의 수직성분에 대하여 면진효과를 고려한다는 것은 불가능하지만, 기존의 면진장치를 이용하였을 경우 지진과의 수직성분에 미치는 영향을 살펴보는 것은 의미가 있는 일로 판단된다.

현재의 시방규정들을 살펴보면 많은 경우 설계기준으로 제시된 수평방향 지진하중의 2/3를 수직하중에 적용하여 설계를 하도록 하고 있다[1,2,3,4]. 국내의 경우 수직방향 하중에 대한 고려가 반드시 이루어져야 하는 사항은 아닐지라도 이러한 항목을 포함하고 있으므로 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 실제 1996년 일본 고베에서 발생한 지진기록을 살펴보면 수평성분의 PGA를 초과하는 크기의 수직성분이 관측되기도 하였다[5]. 이것은 현재 많은 내진설계 기준에서 제시하고 있는 기준을 넘어서는 것으로서 지진과의 수직성분에 대한 연구의 필요성을 제공해주고 있다. 본 연구에서는 기존의 면진장치를 이용한 기기면진시 지진과의 수직성분에 의한 거동의 분석을 통해 향후 수직진동에 대한 면진장치 적용시 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험대상 구조물

본 실험에서 사용한 구조물은 월성원전 2호기 격납건물을 목표로 하여 설계 제작하였다. 목표로 하는 격납건물의 형상은 그림 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 격납건물은 원통형 shell 구조를 가지고 있으며, 직경은 43.6m 이고 돔구조를 제외한 부분의 높이는 48.14m 이다. 현실적으로 격납건물의 축소모형을 만들어서 동적 실험에 사용한다는 것이 어려운 일이므로 월성원전의 격납건물과 유사한 동적특성을 갖는 구조물을 만들기 위하여 제작의 편의성을 고려하여 철골구조물을 제작하였다. 월성원전 2호기 설계자료를 검토한 결과 각 해석모형에 따른 격납건물의 고유진동수는 표 1에 정리한 바와 같이 수평방향의 경우 4Hz 부근이고 수직방향의 경우 8Hz 부근인 것으로 나타나고 있다.

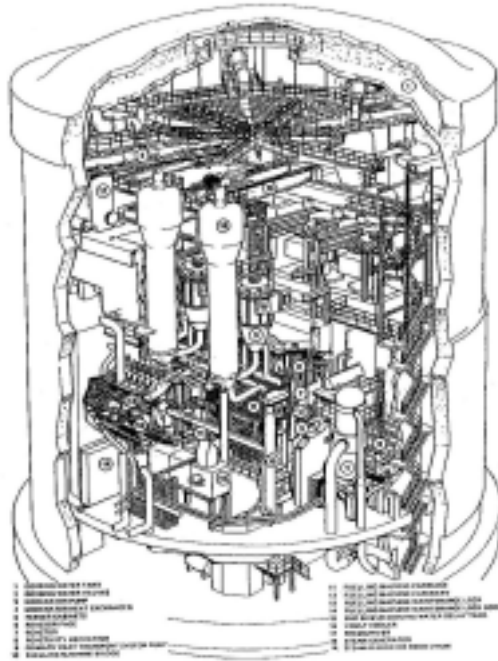


그림 1. 월성 2호기 형상[6]

표 1. 월성원전 2호기 격납건물의 고유진동수(Hz) [7]

모드		모 형					
		축대칭 모형			3차원 모형		
수평	동-서	연암	보통암	경암	연암	보통암	경암
		남-북	3.70	3.96	4.05	3.54	3.74
		3.70	3.96	4.05	3.60	3.80	4.20
연직		8.40	8.69	8.75	7.91	8.05	8.08

여기서 격납건물의 해석모형에 따른 고유진동수에 차이가 발생하는 것은 격납건물의 해석모형에 따른 것이다. 또한 수평방향 모드에서 동-서 방향과 남-북 방향은 수평면상에서 직교하는 진동 방향을 나타내는 것으로서 축대칭 모형에서는 차이가 발생하지 않지만 3차원 모형에서는 약간의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 모형별로 연암, 보통암 그리고 경암조건에 따라 고유진동수의 차이가 발생하는 것을 의미한다. 따라서 본 진동대 실험을 위한 모형은 고유진동수가 4Hz 정도의 구조물로 설계하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 따라서 높이:폭의 비가 이와 유사한 실험모형을 만들기 위하여 그림 2와 같은 3차원 프레임구조를 선택하였다. 실험대상의 모형 구조는 4층으로 이루어진 철골구조로서 기둥의 부재는 강봉으로 하였고 슬래브는 강판을 사용하였다. 또한 기기를 모사하기 위하여 그림에서 표시한 것과 같이 각각 중량 400kg의 강재를 구조물 4층에 면진시킨후 설치하여 대신하도록 하였다[8].

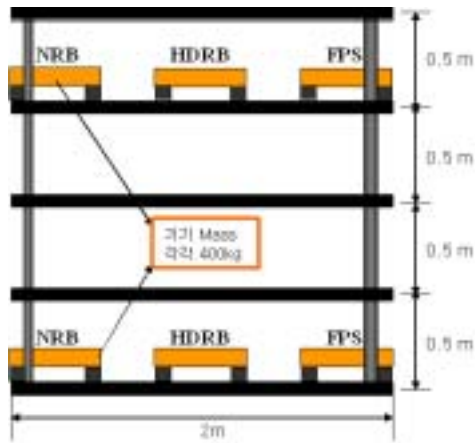


그림 2. 실험모형의 모식도

## 2.2 지진파의 선정

본 실험에서는 3가지의 지진파를 이용하여 실험을 수행하였다. 각 지진기록은 근거리 지진의 성분을 갖도록 만들어진 인공지진시간이력(Scenario)과 원전의 설계를 위한 표준응답스펙트럼을 이용하여 생성된 인공지진(NRC), 그리고 1999년 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진시 계측된 지진(TCU052)이다. 각각의 지진은 0.1g, 0.2g, 그리고 0.25g의 3단계로 하여 사용하였으며 각각의 가속도 시간이력과 응답스펙트럼은 그림 3과 4에 제시하였다[9].

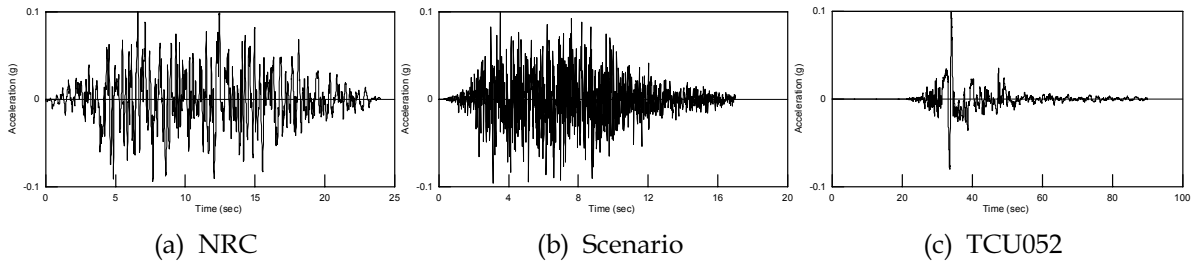


그림 3. 입력지진의 가속도 시간이력

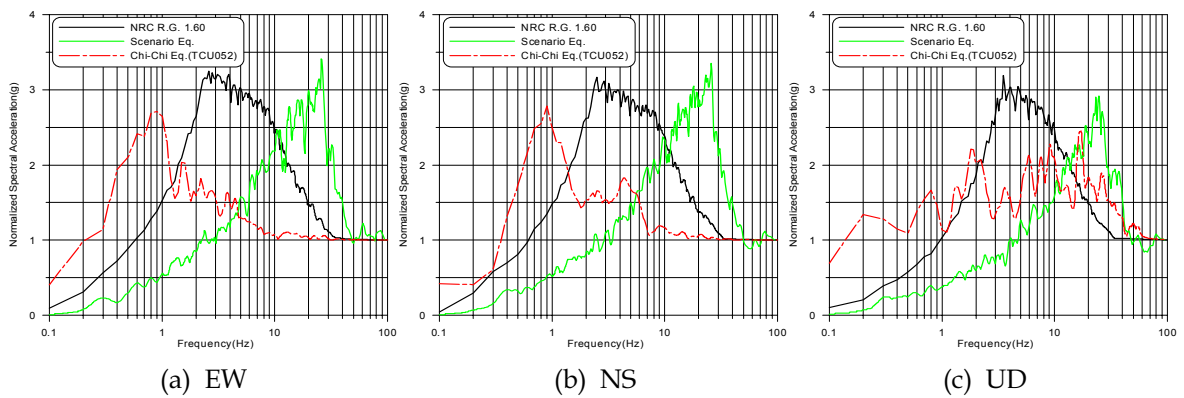


그림 4. 입력지진의 가속도 응답스펙트럼

### 2.3 면진장치의 선정 및 설계

본 실험에서는 고무베어링 두종류와 마찰형 베어링 한종류를 사용하여 진동대 실험을 수행하였다. 고무베어링으로는 NRB(Natural Rubber Bearing)와 HDRB(High Damping Rubber Bearing)를 선택하였으며 마찰형 베어링으로는 FPS(Friction Pendulum System)를 선택하였다. 본 실험의 목적이 소형기기를 위한 면진이기 때문에 면진장치의 수평강성이 너무 크면 면진효과를 발휘할 수 없다. 따라서 예비해석을 통하여 면진기기가 설치될 층의 층응답스펙트럼을 산출하고 그것에 근거하여 면진장치를 설계하였다. 따라서 제작가능한 고무베어링중에 가장 작은 단면을 선택하여 2.3Hz의 고유진동수를 가지도록 설계하였다. 또한 면진장치의 설계에 있어서 수평강성과 관련된 단면을 감소시키기 위하여 중공형 단면을 사용하여 단면적을 최소화 할 수 있었다. HDRB는 NRB와 동일한 형상으로 제작하였다. 본 실험에 사용된 면진장치는 직경 50mm인 중공형 단면에 높이는 58mm로 설계하였으며 제작된 모형을 그림 5(a)에서 제시하였다.

또한 본 실험에 사용한 마찰형 면진장치는 FPS(Friction Pendulum System)로서 고유진동수는 1Hz로 결정하였다. 따라서 식 (1)과 식 (2)에 의하여 FPS의 반경은 24.8cm로, 수평강성은  $4.02 \text{ kgf/cm}^2$ 로 결정하였다[8].

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1)$$

$$K = W/R \quad (2)$$

여기서, T는 FPS의 주기, R은 FPS의 곡률 반경, g는 중력가속도, K는 FPS의 유효수평강성 그리고 W는 상부하중이다. 결정된 값으로 설계한 FPS의 제작된 형상은 그림 5(b)와 같다.



(a) NRB 와 HDRB



(b) FPS

그림 5. 실험에 사용한 면진장치

## 3. 진동대 실험 및 결과분석

### 3.1 실험순서

본 실험을 위해서 표 2에 정리한 바와 같은 순서로 진행하였다. 표에서 보는 바와 같이 PGA를

0.1g, 0.2g 그리고 0.25g의 3단계로 변화시키며 수행하였으며, 하나의 PGA에 대한 실험이 끝나면 전체 시스템의 손상여부를 판단하기 위하여 Modal test를 수행하였다. 계측은 가속도계를 이용하였으며 각 층에서 수평 2방향의 가속도를 측정하였고, 기기에서는 3방향의 가속도를 측정하였다. 다만 기기가 설치되어 있는 4층에서는 3방향의 가속도를 측정하여 기기에서의 응답가속도와 비교할 수 있도록 하였다. 따라서 본 연구에서는 수직방향 가진을 수행한 경우에 면진장치의 응답거동을 분석하였으며, 수평 1방향 가진만을 수행한 경우와 3차원 가진을 수행한 경우 수평방향의 응답을 비교함으로써 수진진동성분이 수평방향 기기면진에 미치는 영향을 분석하였다.

표 2. 진동대 실험순서

실험순서	Earthquake Motion	PGA(g)	비고
1	Modal Test	-	Frequency check
2	Scenario, NRC, TCU052	0.1	-
3	Modal Test	-	Frequency check
4	Scenario, NRC, TCU052	0.2	-
5	Modal Test	-	Frequency check
6	Scenario, NRC, TCU052	0.25	-
7	Modal Test	-	Frequency check

### 3.2 구조물에서의 지진응답 분석

먼저 구조물에서의 응답을 분석해 봄으로서 실험대상 구조물의 동적 특성을 살펴보았다. 3차원 가진인 경우의 응답을 비교하였다. 물론 수직방향 가진만을 수행한 경우가 가장 정확한 결과라고 할 수 있겠지만 본 실험의 목적상 수직방향 하중만 가진한 경우는 없으므로 3차원 가진시 수직성분의 입력과 구조물 4층에서의 응답을 비교하여 표 3에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 각 지진과별로 목표 지진이 다르게 설정되었다. Scenario 지진의 경우는 PGA를 대부분의 설계기준에서 제시하고 있는 바와 같이 수평하중의 2/3로 선정하였으며 TCU052의 경우는 실제 계측된 비율에 맞추어서 수직지진의 PGA를 결정하였다. NRC의 경우는 수평하중과 동일한 PGA로 가진하였다. 물론 실제로 가진된 지진과는 진동대의 특성상 목표로 설정한 것과는 차이가 나게 된다. 따라서 실제 진동대에 입력된 지진력을 기준으로 비교하였다.

표 3. 실험대상 구조물의 수직방향 지진응답

지진과	Target PGA(g)	Real PGA(g)	Structural Response (g)	지진응답비	평균
Scenario	0.067	0.081	0.131	1.613	1.575
	0.134	0.215	0.339	1.573	
	0.201	0.292	0.449	1.540	
TCU052	0.044	0.056	0.076	1.363	1.281
	0.088	0.103	0.133	1.286	
	0.11	0.135	0.161	1.193	
NRC	0.1	0.122	0.141	1.160	1.096
	0.2	0.244	0.267	1.096	
	0.25	0.312	0.322	1.032	

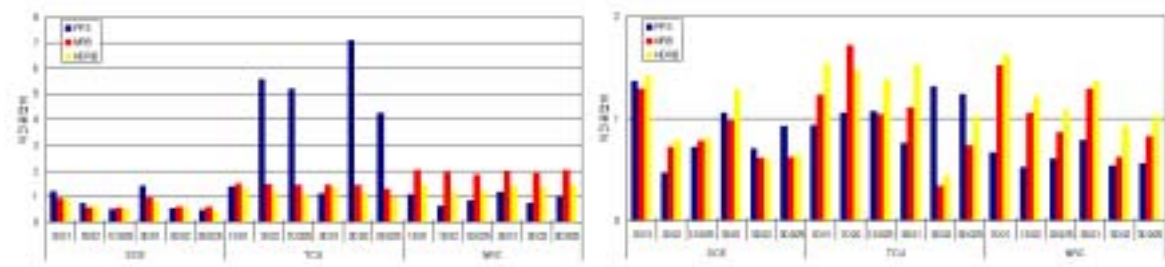
구조물에서의 응답을 살펴보면 Scenario 지진의 경우는 입력지진에 비해 구조물에서의 응답이 1.5배 정도 증가한 것을 알 수 있고 NRC의 경우는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 구조물은 수직방향 고유진동수가 고주파수에 해당하므로 고주파수 성분을 가지고 있는 Scenario 지진의 고주파 성분과 공진을 일으켜서 지진력이 증폭된 것으로 판단된다.

### 3.3 지진파의 수직성분에 의한 수평 지진응답 분석

수직지진이 작용할 때 수평방향 면진장치의 면진거동에 대하여 살펴보기 위하여 1차원 가진인 경우와 3차원 가진인 경우의 지진응답비를 비교하여 보았다. 각 지진파와 1층과 4층에 설치된 면진장치별로 지진응답비를 구하였고 또한 각 경우의 평균값을 구하여 표 4에 정리하여 나타내었고 그림 6에서는 그래프로 정리하여 도시하였다. 본 연구에서는 1차원 가진과 3차원 가진의 면진장치 거동의 차이를 비교해 보기 위한 것이므로 그에 초점을 맞추었다. 표에서 보는 바와 같이 1층 기기에서의 지진응답비를 보면 각 지진파에 따른 1차원 가진과 3차원 가진의 지진응답비가 유사한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 4층 기기의 응답비를 비교해 보면 각 지진파별로 지진입력의 차원에 따른 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 즉 FPS의 경우는 3차원 가진인 경우가 면진효과가 감소하는 반면 NRB와 HDRB의 경우는 면진효과가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 지진파와 면진장치와의 복합적인 거동을 통해서 나타나는 현상인 것으로 판단되며 단순히 PGA만의 비교를 통해서 결론을 내리기에는 부족한 면이 없지 않다.

표 4. 수평방향 지진응답비

지진파	차원	1층						4층					
		FPS		NRB		HDRB		FPS		NRB		HDRB	
Scenario	1D01	1.19	0.80	0.93	0.68	0.88	0.67	1.36	0.85	1.29	0.93	1.42	1.00
	1D02	0.72		0.55		0.61		0.47		0.72		0.78	
	1D025	0.49		0.55		0.52		0.72		0.77		0.81	
	3D01	1.40	0.79	0.94	0.70	0.78	0.59	1.05	0.89	0.98	0.73	1.28	0.84
	3D02	0.53		0.57		0.56		0.70		0.61		0.60	
	3D025	0.45		0.58		0.43		0.92		0.61		0.64	
TCU052	1D01	1.37	4.04	1.48	1.47	1.28	1.18	0.93	1.01	1.23	1.32	1.54	1.46
	1D02	5.56		1.48		1.18		1.05		1.71		1.47	
	1D025	5.19		1.45		1.08		1.06		1.04		1.37	
	3D01	1.10	4.14	1.45	1.39	1.33	1.13	0.75	1.09	1.10	0.72	1.52	0.99
	3D02	7.07		1.44		1.13		1.30		0.33		0.44	
	3D025	4.26		1.27		0.94		1.23		0.73		1.02	
NRC	1D01	1.08	0.84	2.01	1.92	1.45	1.26	0.66	0.59	1.52	1.14	1.62	1.30
	1D02	0.61		1.92		1.16		0.51		1.05		1.21	
	1D025	0.83		1.83		1.18		0.60		0.86		1.08	
	3D01	1.15	0.97	1.98	1.96	1.37	1.38	0.78	0.63	1.29	0.91	1.37	1.10
	3D02	0.74		1.88		1.33		0.54		0.62		0.92	
	3D025	1.02		2.01		1.43		0.56		0.82		1.02	



(a) 1층 기기

(b) 4층 기기

그림 6. 수직지진 유무에 따른 기기의 지진응답비

그림 6의 결과와도 같이 비교해 보면 4층 기기는 FPS의 경우와 RB의 응답의 경향이 명확하게 대별되는 것을 알 수 있다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 FPS는 3차원 가진인 경우가 1차원 가진인 경우에 비하여 지진응답비가 불리한 것으로 나타나고 있는 반면 NRB와 HDRB의 경우는 1차원 가진의 경우가 3차원 가진인 경우에 비하여 면진효과가 떨어지는 것으로 나타나고 있다. 이러한 이유는 FPS는 상재하중에 의한 마찰력으로 면진효과를 나타내는 장치이므로 수직하중이 작용할 때 실제 마찰력에 변화를 주기 때문인 것으로 판단되며 이러한 영향이 마찰력을 감소시키므로 인해서 면진효과를 떨어뜨리는 것으로 판단된다. 반면 고무베어링의 경우는 수평하중과 수직하중의 복합적인 거동에 의해서 3차원 가진인 경우 면진효과가 더 우수한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 거동은 본 실험에서 사용한 면진장치의 고무층의 두께가 전체 베어링의 두께에 비하여 상대적으로 크기 때문에 일반적인 거동이라고 결론짓기에는 무리가 있다고 사료된다. 그러나 마찰베어링의 경우는 3차원 가진지 면진효과가 감소하고 고무베어링의 경우에는 면진효과가 증가한다고 잠정적인 결론을 내릴 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.4 수직지진시 면진기기에서의 지진응답

실제적으로 수직지진에 의한 면진효과를 살펴보기 위하여 3차원 가진을 한 경우에 대하여 입력과 응답과의 비를 비교하여 면진효과를 분석하였다. 각 경우의 지진응답비를 1층 기기의 경우는 표 5에 4층 기기의 경우는 표 6에 정리하였다. 또한 각각의 지진응답비를 그림 7에 도시하였다. 전체적으로 표에서 나타나고 있는 결과를 보면 본 실험에 사용한 면진장치들은 수직방향 지진에 대해서는 전혀 면진효과를 발휘하지 못하고 오히려 고정시켜 놓은 경우에 비하여도 불리한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 오로지 수평방향 하중에 대해서만 고려하여 제작된 면진장치이므로 어쩔 수 없는 결과인 것으로 판단되며 다만 본 논문에서는 이러한 경우에 각 면진장치별 거동을 비교하였다. 표 5에서 제시하고 있는 1층 기기의 경우는 지진파별로는 TCU052지진이 지진파가 가장 증폭되는 것으로 나타났고 면진장치별로는 FPS의 성능이 가장 우수한 것으로 나타나고 있다. 1층 기기의 응답은 구조물의 특성과 관계없이 오로지 지진파의 특성에 의한 면진장치의 거동에 관계하는 것이므로 그림 4(c)에서 제시하고 있는 입력지진의 수직성분의 특성을 그대로 반영한다고 할 수 있다.

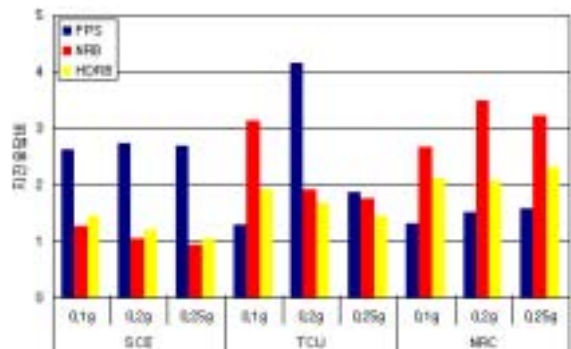
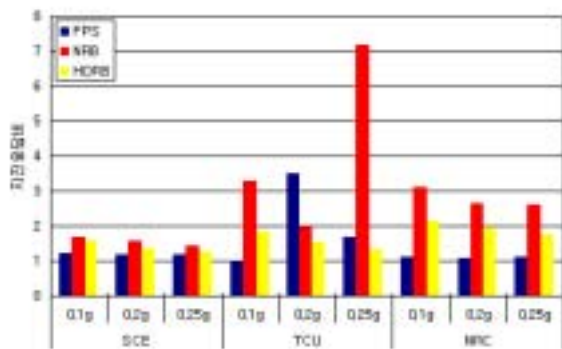


표 5. 1층 기기의 수직지진에 대한 지진응답비

지진과	목표PGA	real	FPS	NRB	HDRB	지진과별 평균
Scenario	0.1g	0.081	1.23	1.66	1.58	1.38
	0.2g	0.215	1.18	1.57	1.36	
	0.25g	0.292	1.18	1.43	1.24	
TCU052	0.1g	0.056	1.02	3.29	1.84	2.59
	0.2g	0.103	3.49	1.97	1.53	
	0.25g	0.135	1.69	7.17	1.33	
NRC	0.1g	0.122	1.09	3.09	2.15	1.94
	0.2g	0.244	1.08	2.65	1.94	
	0.25g	0.312	1.09	2.61	1.76	
면진장치별 평균			1.45	2.83	1.64	

표 6. 4층 기기의 수직지진에 대한 지진응답비

지진과	목표PGA	4층	FPS	NRB	HDRB	지진과별 평균
Scenario	0.1g	0.131	2.62	1.26	1.46	1.66
	0.2g	0.339	2.72	1.04	1.21	
	0.25g	0.449	2.68	0.93	1.04	
TCU052	0.1g	0.076	1.29	3.14	1.92	2.13
	0.2g	0.133	4.16	1.90	1.66	
	0.25g	0.161	1.87	1.76	1.45	
NRC	0.1g	0.141	1.31	2.66	2.11	2.25
	0.2g	0.267	1.52	3.50	2.06	
	0.25g	0.322	1.59	3.23	2.31	
면진장치별 평균			2.20	2.16	1.69	



(a) 1층 기기

(b) 4층 기기

그림 7. 수직지진에 대한 지진응답비

표 6의 결과에서는 4층 기기의 응답특성을 나타내고 있는데 여기서는 NRC지진의 응답이 가장 크게 증폭되는 것으로 나타나고 있다. 면진장치는 FPS의 경우가 가장 좋은 거동을 보이는 것으로 나타났다. FPS는 수직방향으로 압축으로는 매우 큰 강성을 가지고 있는 반면 인장강성은 없으며

로 수직방향에 대한 거동을 예측하기가 매우 어려운데 1층과 4층의 결과에서 특이한 사항은 수직 방향 강성이 가장 클 것으로 예상되는 FPS가 1층의 기기에서는 가장 좋은 거동을 보인 반면 4층에서는 가장 큰 증폭을 일으킨 것이다. 따라서 수직방향의 응답도 각 면진장치의 수직방향 고유진동수의 파악에 따른 검토가 있어야 할 것으로 판단된다. 이에 대한 좀 더 세밀한 검토를 위하여 목표지진 0.1g인 경우에 대하여 수직방향 각 층의 응답스펙트럼과 기기에서의 응답스펙트럼을 비교하여 그림 8에 도시하였다.

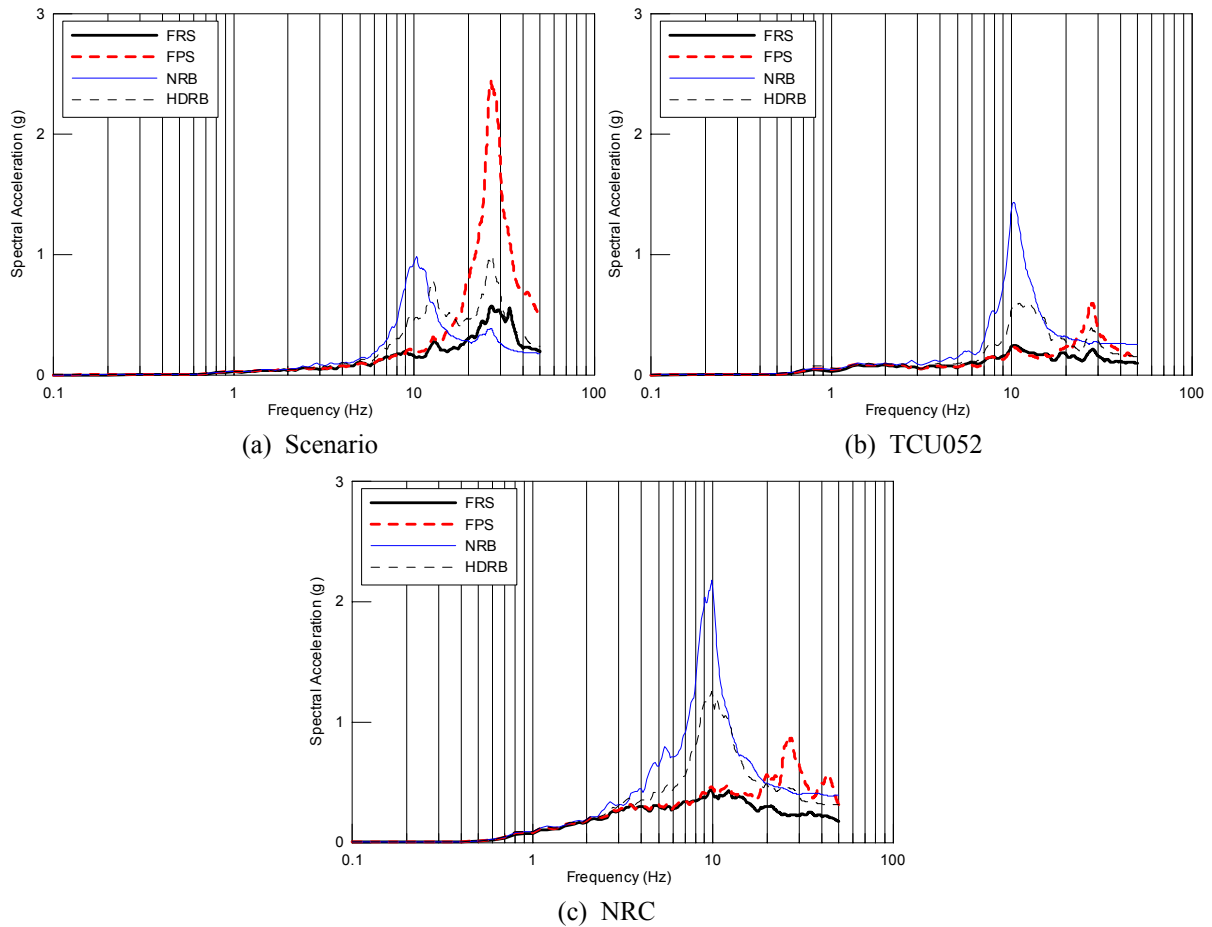


그림 8. 4층 기기의 수직방향 응답스펙트럼

그림 8에서 보면 모든 지진파는 구조물의 고유진동수를 반영하여 10Hz 이상에서 증폭이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 표 1의 월성원전 격납건물의 설계자료와도 비추어 수직방향의 고유진동수로서 적절하게 설계가 된 것으로 판단된다. 각 기기에서의 응답은 지진파에 따라서 차이가 나는데 전체적으로는 NRB가 HDRB에 비하여 증폭이 크게 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 HDRB의 고감쇠 특성이 수직방향 진동을 다소 제어하고 있는 결과로 판단된다. 또 Scenario 지진의 경우 FPS가 크게 증폭되는 것을 알 수 있는데 FPS는 수직방향으로 큰 강성을 가지고 있는 것으로 판단되며 이러한 특징이 Scenario 지진의 고주파 성분과 공진하여 크게 증폭된 응답을 가져

오는 것으로 판단된다. 그림의 응답스펙트럼으로 미루어 NRB와 HDRB의 수직방향 고유진동수는 10Hz 정도인 것으로 판단되며 FPS는 25Hz 부근에서 수직방향 고유진동수가 발생하는 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 마찰진자형 베어링(FPS)과 천연고무 베어링(NRB) 및 고감쇠고무 베어링(HDRB)의 3종류의 면진장치를 이용한 원전격납건물 내부에 설치된 소규모 기기의 면진효과를 분석하기 위한 진동대 실험을 통해서 수직방향 지진이 작용하였을 때 기기면진에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 분석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 1차원 가진의 경우와 3차원 가진의 경우 수평방향 지진응답을 비교하므로써 수직방향 지진동이 수평방향 면진에 미치는 영향을 살펴보았다. 검토결과 FPS는 3차원 가진인 경우가 1차원 가진인 경우에 비하여 면진효과가 감소하는 것으로 나타나고 있는 반면 NRB와 HDRB의 경우는 3차원 가진의 경우가 1차원 가진인 경우에 비하여 면진효과가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 이유는 수직방향 하중이 FPS의 마찰력을 감소시키기 때문인 것으로 판단되며, 고무베어링의 경우는 수평하중과 수직하중의 복합적인 거동에 의해서 3차원 가진인 경우 면진효과가 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서 마찰베어링의 경우는 3차원 가진시 면진효과가 감소하고 고무베어링의 경우에는 면진효과가 증가한다고 잠정적인 결론을 내릴 수 있을 것으로 판단된다.
2. 수직진동 자체에 대한 지진응답비를 검토해 본 결과 각 기기에서의 응답은 지진파에 따라서 차이가 나는데 전체적으로는 NRB가 HDRB에 비하여 증폭이 크게 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 HDRB의 고감쇠 특성이 수직방향 진동을 제어하고 있는 것에 기인하는 것으로 판단되며, Scenario 지진의 경우 FPS가 크게 증폭되는 것을 알 수 있는데 FPS는 수직방향의 큰 강성이 Scenario 지진의 고주파 성분과 공진하여 크게 증폭된 응답을 가져오는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 실험은 과학기술부 원자력 중장기연구인 "구조물 건전성 평가기술 개발" 과제의 일환으로 수행되었으며 진동대 실험을 수행한 한국기계연구원과 면진장치를 제작한 (주)케이알에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. ASCE, "Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities," American Society of Civil Engineers, 1980.
2. ASCE, "Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary," American

Society of Civil Engineers, 1999.

3. FEMA-350, "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Building," Federal Emergency Management Agency, 2000.
4. 건설교통부, 내진설계기준연구, 1997.
5. PEER Strong Motion Database, <http://nisee.berkeley.edu/>
6. 월성원자력 2,3,4호기 최종안전성 분석 보고서, 한국전력공사
7. Wolsong 2 Nuclear Power Plant Design Report for Reactor Building Containment Structure Stress Analysis, Design Report 8602-21020-0002-00-DR-A, Canatom Inc., March 1994.
8. 김민규, 전영선, 최인길, "원전기기의 내진성능 향상을 위한 면진장치 효율성 평가," 한국원자력학회 2003 추계학술발표회 논문집, 2003. 10. 30-31. 용평.
9. 전영선, 김민규, 최인길, "소형기기 면진장치의 기계적 특성 분석," 한국원자력학회 2003 추계학술발표회 논문집, 2003. 10. 30-31. 용평.